

Высококачественная лазерная резка нержавеющей стали в атмосфере инертного газа с помощью волоконного иттербиевого и CO₂-лазеров

А.А.Гольшев, А.Г.Маликов, А.М.Оришич, В.Б.Шулятьев

Приведены результаты экспериментального сравнения резки нержавеющей стали излучениями волоконного иттербиевого и CO₂-лазеров. Определены шероховатости поверхности реза при толщинах листа 3 и 5 мм. Измерен коэффициент поглощения лазерного излучения в процессе резки. Установлено, что мощность поглощённого металлом излучения при резке с одинаковой скоростью в случае CO₂-лазера больше, чем в случае иттербиевого лазера. Предложено объяснение меньшей максимальной скорости резки излучением CO₂-лазера по сравнению с резкой излучением волоконного иттербиевого лазера.

Ключевые слова: лазерная резка, CO₂-лазер, волоконный иттербиевый лазер, шероховатость реза, скорость резки, энергетическая эффективность.

1. Введение

В последнее время для резки металлов всё шире применяются волоконные и дисковые лазеры, которые имеют ряд преимуществ перед CO₂-лазерами. К настоящему времени накоплены экспериментальные данные по резке различных металлических материалов излучением твердотельных лазеров с длиной волны 1 мкм (достаточно подробный обзор работ по этой теме дан в [1]). Можно считать надёжно установленным, что при резке в атмосфере инертного газа твердотельные лазеры при одинаковой мощности излучения обеспечивают по сравнению с CO₂-лазерами значительно большую скорость резки тонких листов (в 3–4 раза при толщине листов 1–2 мм) [2, 3]. При толщине более 3–4 мм преимущество в скорости менее заметно, а при толщине 10 мм оно практически исчезает. При этом при резке толстых листов применение CO₂-лазера обеспечивает лучшее качество кромки. Ограничение скорости или прекращение резки может происходить по двум причинам: из-за недостаточного энерговклада или из-за низкой скорости удаления расплава и «заплавания» реза [4]. Вторая причина имеет место при больших скоростях резки (более 10–15 м/мин) [4]. Различию в скоростях резки с помощью двух типов лазеров обычно дают «энергетическое» объяснение и связывают его с различным френелевским поглощением на фронте реза для излучения с длиной волны $\lambda = 1$ и 10 мкм [5]. В известных математических моделях лазерной резки формирование фронта реза и поглощение излучения на нём рассчитываются без учёта влияния расплава (см., напр., [5–7]). В зависимости от параметров плёнки расплава и

характера течения реальная форма фронта и боковой поверхности реза может существенно отличаться от рассчитанной в идеализированном случае [8, 9]. К настоящему времени не построены теоретические модели лазерной резки, которые бы полно и адекватно описывали гидродинамические явления при формировании канала реза. В связи с этим актуальны сравнительные экспериментальные исследования характеристик реза для двух типов лазеров [1, 8].

Следует особо отметить, что в большинстве теоретических и экспериментальных работ выбор параметров резки делается без учёта качества реза, в то время как важнейшим для многих применений показателем качества является шероховатость поверхности реза, и степень шероховатости иногда используют как синоним качества [10]. Как отмечено в [10], увеличение толщины разрезаемых твердотельным лазером листов при сохранении высокого качества реза (на уровне, обеспечиваемом CO₂-лазером) является в настоящее время одним из основных направлений совершенствования методики лазерной резки. Поэтому интерес представляет сравнительное исследование характеристик реза при максимально достижимом для каждого типа лазеров качестве реза. В [11, 12] нами проведена оптимизация, а в [13] измерен энергетический баланс при условии минимума шероховатости для лазерно-кислородной резки низкоуглеродистой стали при использовании CO₂-лазера. Насколько нам известно, подобные исследования резки нержавеющей стали в атмосфере инертного газа для волоконного лазера, в отличие от CO₂-лазера, не проводились. Например, в [1] при измерении энергетического баланса резки авторы стремились обеспечить одинаковые значения исходных параметров для двух лазеров. Однако оптимальные параметры для одного типа лазеров могут быть не оптимальными для другого, и результаты таких измерений могут существенно отличаться от результатов, полученных при условии минимума шероховатости.

Резка в атмосфере инертного газа существенно отличается от лазерно-кислородной резки – отсутствует дополнительный источник энергии в виде экзотермической

А.А.Гольшев, А.Г.Маликов, А.М.Оришич, В.Б.Шулятьев. Институт теоретической и прикладной механики им. С.А.Христиановича СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, ул. Институтская, 4/1; e-mail: shulyat@rambler.ru

Поступила в редакцию 4 октября 2013 г., после доработки – 25 декабря 2013 г.

реакции окисления, разрушение материала на фронте реза и распространение фронта реза происходят по другим механизмам. Поэтому определение энергетического баланса и условий получения качественного реза при лазерной резке в атмосфере инертного газа требует отдельных исследований. Целью настоящей работы является сравнительная экспериментальная оценка энергетического баланса и определение скорости резки нержавеющей стали излучениями волоконного и CO_2 -лазеров при условии минимизации шероховатости поверхности реза.

2. Схема эксперимента

Для резки применялся иттербиевый лазер IPG/IRE-Polus с коллиматором (IPG, модель D5-WC/AC) с мощностью 2 кВт и параметром качества пучка $\text{BPP} = 3.8$ мм·мрад. Диаметр пучка на фокусирующей линзе после коллиматора был равен 17 мм при фокусном расстоянии линзы 200 мм. Использовался также CO_2 -лазер [14, 15] с самофильтрующим резонатором с мощностью до 8 кВт и $\text{BPP} = 4.7$ мм·мрад. Диаметр пучка на фокусирующей линзе составлял 25 мм при её фокусном расстоянии 127 мм. Распределение интенсивности излучения в фокусе линзы близко к гауссову. Диаметр сфокусированного пучка в перетяжке оценивался как сумма дифракционного диаметра и диаметра кружка рассеяния вследствие сферической aberrации. Рассчитанный суммарный диаметр равен 180 мкм для волоконного лазера и 160 мкм для CO_2 -лазера.

Квадратные образцы вырезались из листов нержавеющей стали 12X18H10T. Давление азота в резаке составляло 1.3–1.6 МПа. Все измерения проводились при мощности лазеров 2 кВт. Разрезались листы нержавеющей стали толщиной 3 и 5 мм. Для этих толщин исследовалась шероховатость поверхности в зависимости от скорости резки, при этом для каждой скорости положение перетяжки оптимизировалось по критерию минимума шероховатости для каждого из лазеров.

В качестве меры шероховатости (характерной высоты неоднородности) выбрана величина R_a (среднее арифметическое отклонение профиля), которая измерялась с помощью лазерного конфокального сканирующего микроскопа Olympus LEXT. Для определения энергетического баланса были измерены коэффициенты поглощения лазерного излучения при резке металла по методике, подробно описанной в работе [16] и использованной нами при анализе энергетического баланса резки излучением CO_2 -лазера в атмосфере кислорода [11–13]. Прошедшее излучение попадало на приемник (измеритель мощности ORHIR 5000W-CAL-SH).

Под коэффициентом поглощения в данном случае понимается интегральный коэффициент, который учитывает также мощность излучения, поглощённого при возможных многократных его отражениях от фронта и стенок реза: $A = (W - W_{\text{tr}})/W_{\text{tr}}$, где W – мощность лазерного излучения перед фокусирующей линзой, а W_{tr} – мощность излучения, прошедшего через канал реза. При этом специально контролировались размер и отклонение пучка излучения при взаимодействии его с материалом в процессе резки, для того чтобы всё излучение, прошедшее через зону реза, попадало в приёмник. Удаляемые из зоны реза частицы расплава сдувались струей воздуха, их попадание на приёмник исключалось.

3. Результаты экспериментов и их обсуждение

На рис.1 приведены фотографии типичных сечений канала реза и поверхностей реза нержавеющей стали излучениями волоконного иттербиевого лазера с $\lambda = 1.07$ мкм и газоразрядного CO_2 -лазера с $\lambda = 10.6$ мкм. Для толщин листа $h = 3$ и 5 мм было проведено детальное исследование шероховатости поверхности реза. Для этого измерялась шероховатость R_a вдоль линии длиной 3 мм, параллельной поверхности листа. Шероховатость измерялась в 26 сечениях, например, при толщине листа $h = 3$ мм измерение проводилось с интервалом 120 мкм. Типичные результаты измерений приведены на рис.2. Видно, что характер распределения шероховатости R_a по глубине для

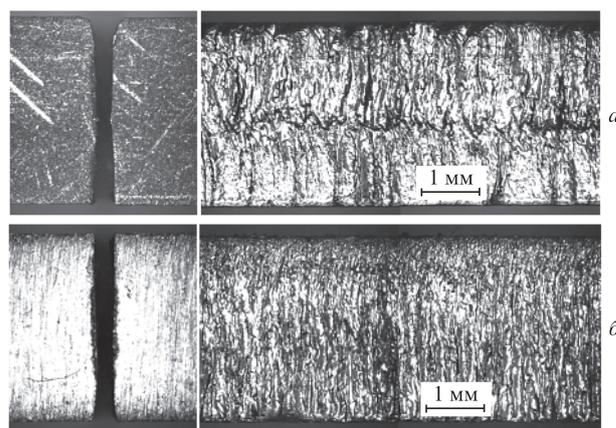


Рис.1. Сечения канала реза и поверхности реза при использовании CO_2 -лазера (а) и волоконного лазера (б) для $h = 3$ мм и $W = 2$ кВт.

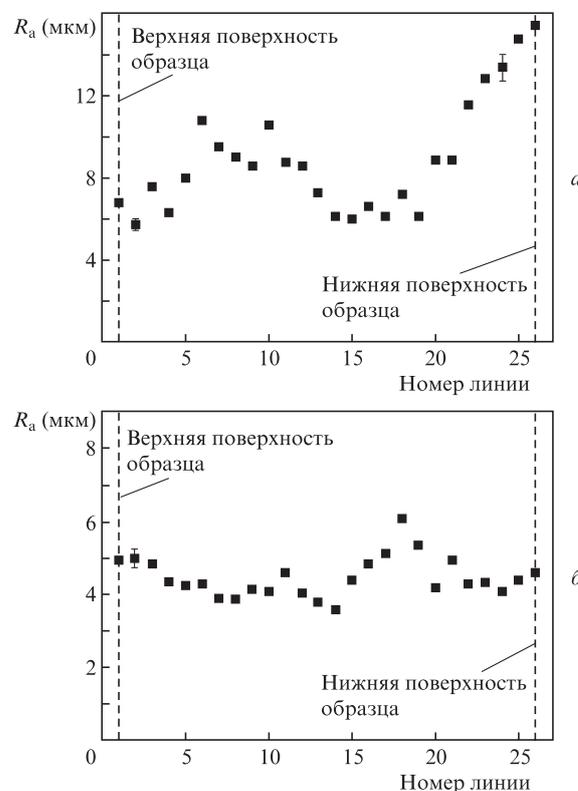


Рис.2. Шероховатость поверхности R_a на разном расстоянии от поверхности образца для CO_2 -лазера (скорость резки $V_c = 1.5$ м/мин; а) и волоконного лазера ($V_c = 3$ м/мин; б).

используемых лазеров различен, однако наблюдается её сильная неоднородность по глубине – почти в два раза. Отметим возрастание шероховатости для CO₂-лазера в нижней части реза.

Представленные результаты наглядно показывают, что сравнение образцов реза по шероховатости в отдельных точках по высоте канала реза может привести к ошибочным выводам, и необходимо использовать средние по всей толщине пластины значения R_a . Данные по такой средней шероховатости, полученные при оптимизации положения фокуса относительно поверхности листа для каждого значения скорости резки V_c , представлены на рис.3 для $h = 3$ и 5 мм. Видно, что средняя шероховатость больше при малых скоростях, уменьшается с ростом скорости до некоторого значения и затем остается постоянной вплоть до максимального, критического значения скорости, после которого резка невозможна. Критические скорости V_c^{cr} приведены в табл.1.

Важно отметить, что значения средней шероховатости для оптимального положения фокуса при одинаковой скорости для обоих типов лазеров близки, однако предельная скорость резки излучением волоконного лазера почти в 1.5–2 раза выше (см. табл.1).

Особенности структуры реза при близкой к критической скорости резки были исследованы на примере резки излучением CO₂-лазером пластины толщиной 3 мм. На

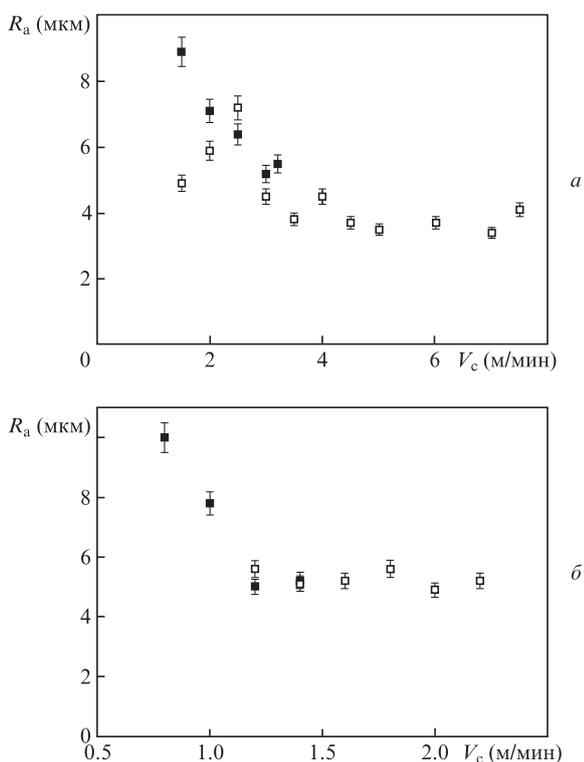


Рис.3. Зависимости средней по толщине пластины шероховатости от скорости резки для $h = 3$ (а) и 5 мм (б) при использовании CO₂-лазера (темные точки) и волоконного лазера (светлые точки).

Табл.1. Критические скорости резки нержавеющей стали.

Тип лазера	h (мм)	V_c^{cr} (м/мин)
CO ₂ -лазер	3	3.2 ± 0.05
	5	1.4 ± 0.05
Волоконный лазер	3	7.5 ± 0.05
	5	2.2 ± 0.05

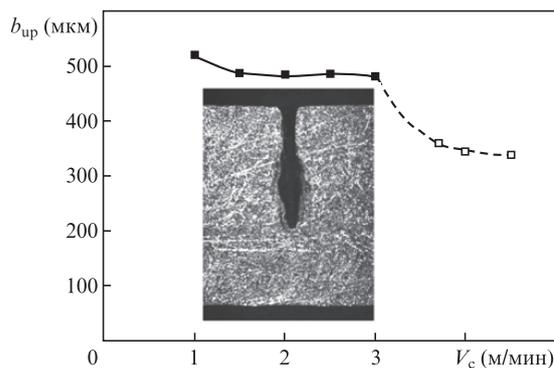


Рис.4. Зависимости ширины реза на верхней поверхности листа b_{up} при резке излучением CO₂-лазера листа нержавеющей стали толщиной 3 мм от скорости резки V_c . Сплошная кривая – качественный рез, штриховая – рез при скорости выше критической. На фотографии – шлиф канала реза при $V_c = 4$ м/мин.

рис.4 приведены фотография шлифа реза и зависимость ширины реза на верхней поверхности листа b_{up} для CO₂-лазера от скорости резки для толщины пластины $h = 3$ мм. Представлены данные как при резке в оптимальном режиме при скорости, меньшей критической, так и при больших скоростях. Необходимо отметить, что местами расплав удалялся из канала потоком газа (см. рис.4), однако чаще наблюдалось «заплавление» канала. По шлифам канала реза, подобным представленным на рис.1, были определены ширины реза. Ширина реза b_{up} измерялась на входе в канал, средняя ширина реза b_{av} находилась из выражения $b_{av} = S/h$, где S – площадь сечения канала. Для определения S делались шлифы сечения реза для каждого образца. Отметим, что величина b_{up} существенно больше b_{av} в случае резки с помощью CO₂-лазера, что хорошо видно на рис.1,б. Однако, при достижении критической скорости (рис.4), наблюдаются излом зависимости $b_{up}(V_c)$ и резкое уменьшение b_{up} .

На рис.5 приведены коэффициенты поглощения излучения A в зависимости от скорости резки излучениями волоконного и CO₂-лазеров для толщин пластины $h = 3$ и 5 мм. Отметим, что значения A существенно больше для случая CO₂-лазера по сравнению со случаем волоконного лазера при одинаковой скорости резки.

Измеренные средние ширины реза для $h = 3$ и 5 мм позволили определить основные оптимальные энергетические параметры: число Пекле $Pe = (V_c b_{av})/\gamma$, где $\gamma = 5.7$ мм²/с – температуропроводность материала, и плот-

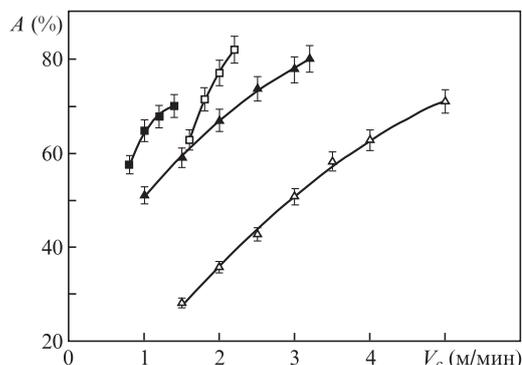


Рис.5. Зависимости коэффициента поглощения лазерного излучения от скорости резки с помощью CO₂-лазера (темные точки) и волоконного лазера (светлые точки) для $h = 3$ (▲, △) и 5 мм (■, □).

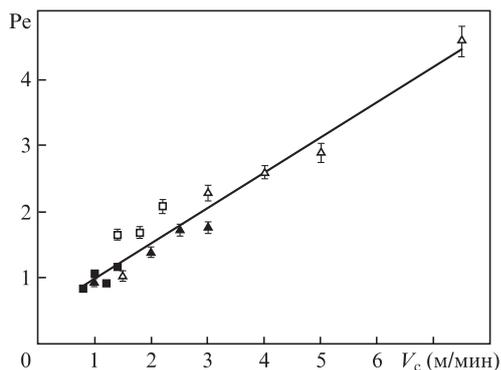


Рис.6. Зависимости числа Пекле от скорости резки с помощью СО₂-лазера (темные точки) и волоконного лазера (светлые точки) для $h = 3$ (▲, △) и 5 мм (■, □).

ность поглощенной энергии $G = AW/(V_c b_{av} h)$ в единице объёма расплава. Результаты представлены на рис.6 и 7. Видно, что числа Пекле при резе излучениями двух лазеров близки, не зависят от толщины разрезаемого листа

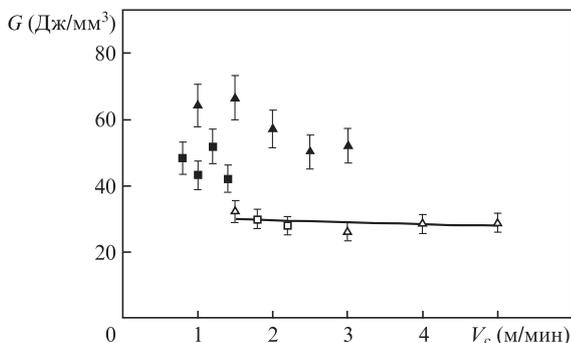


Рис.7. Зависимости плотности поглощенной энергии G от скорости резки с помощью СО₂-лазера (темные точки) и волоконного лазера (светлые точки) для $h = 3$ (▲, △) и 5 мм (■, □).

и возрастают со скоростью резки. Плотность поглощённой энергии при условии оптимизации по минимуму шероховатости при резке излучением волоконного лазера практически не зависит от скорости резки и толщины листа. В случае волоконного лазера в интервале скоростей $1.5-5$ м/мин (рис.7) для $h = 3$ и 5 мм плотность энергии G изменяется в интервале $26-32$ Дж/мм³. При резке излучением СО₂-лазера наблюдается существенно больший разброс плотностей энергии: $42-66$ Дж/мм³. В среднем плотность энергии в случае СО₂-лазера оказалась примерно в два раза больше, чем в случае волоконного лазера.

4. Обсуждение результатов

Для получения более полной и взаимосвязанной физической картины процесса образования лазерного реза рассмотрим энергетический баланс резки при использовании азота в качестве вспомогательного газа. Уравнение баланса описывается известным выражением [1, 8]:

$$AW = W_m + W_{cond} + W_{etc}, \tag{1}$$

где W_m – мощность, затрачиваемая на нагрев и плавление металла; W_{cond} – мощность, теряемая из зоны реза за счёт теплопроводности в окружающий материал; W_{etc} – прочие потери мощности поглощённого излучения, включа-

ющие в себя потери на конвективное и радиационное охлаждение. Величину W_m можно вычислить из выражения

$$W_m = V_c h b_{av} [\rho_m c_m (T_m - T_0) + \rho_m L_m + \rho_g c_g (T^* - T_m)], \tag{2}$$

где c_m, ρ_m и c_g, ρ_g – средние в процессе резки удельная теплоемкость и плотность металла и расплава соответственно; L_m – теплота плавления; $T_m - T_0$ – изменение температуры металла в процессе резки до начала плавления; $T^* - T_m$ – изменение температуры расплава. В (2) первый член представляет собой мощность, затрачиваемую на нагрев металла до температуры плавления, второй – на плавление, третий – на нагрев расплава до температуры T^* .

Для оценки тепловых потерь используем соотношение [17]

$$W_{cond} = 3.2 \lambda_m h (T^* - T_m) Pe^{0.868}, \tag{3}$$

где λ_m – теплопроводность материала.

Подставляя (2) и (3) в (1) и пренебрегая прочими потерями мощности [1], получаем общее выражение для плотности поглощенной энергии:

$$\begin{aligned} \frac{AW}{V_c h b_{av}} &= \rho_m L_m + [\rho_m c_m (T_m - T_0) + \rho_g c_g (T^* - T_m)] \\ &+ \frac{1.6 \rho_m c_m (T^* - T_0)}{Pe^{0.132}}. \end{aligned} \tag{4}$$

Необходимо отметить, что в [17] при расчёте числа Пекле Pe использовалась полуширина канала. В настоящей работе число Пекле определяется по полной ширине канала, поэтому при использовании выражений (3) и (4) экспериментальные значения Pe необходимо уменьшить в два раза.

Из (4) видно, что плотность поглощенной энергии очень слабо зависит от числа Пекле и определяется единственным параметром – T^* , т.е. степенью перегрева расплава. Из приведенных данных (рис.6) видно, что числа Пекле при максимальной скорости резки близки для обоих типов лазеров. Плотность поглощенной энергии, согласно данным рис.7, в случае СО₂-лазера существенно больше, чем в случае волоконного лазера. Это означает, согласно (4), что расплав должен быть существенно перегрет и содержать избыточную энергию, но в эксперименте при этом наблюдалось прекращение резки. Используя для оценки $\rho_m = \rho_g = 7900$ кг/м³, $c_m = c_g = 596$ Дж·кг⁻¹·К⁻¹, $L_m = 276$ кДж/кг, получаем из (4) в случае волоконного лазера при характерной плотности поглощенной энергии $G = 28$ Дж/мм³ и числе Пекле $Pe = 2.5$ изменение температуры $T^* - T_0 = 1800$ °С. Однако при резке излучением СО₂-лазера плотности энергии $G = 57$ Дж/мм³ и числу Пекле $Pe = 1.37$ соответствует $T^* - T_0 = 3600$ °С. Таким образом, уравнения энергетического баланса (1)–(4), обычно используемые для определения максимальной скорости резки, дают реалистичную оценку температуры расплава в случае волоконного лазера. Однако в случае СО₂-лазера полученная из (4) температура расплава значительно превышает температуру кипения материала и является явно завышенной для резки в режиме плавления. Причиной этого может быть существенно завышенное в случае СО₂-лазера значение коэффициента поглощения лазерного излучения, измеренное как относительная разность мощно-

стей перед фокусирующей линзой и на выходе из канала реза, когда не учитывается возможное отражение от поверхности листа [16].

Рассмотрим принципиально другой подход к обсуждению проблемы меньшей критической скорости резки излучением CO₂-лазера по сравнению с резкой излучением волоконного лазера. Он основан на предположении об определяющей роли процессов, происходящих на поверхности листа стали, т.е. процессов инициирования и образования канала реза. Пространственное распространение фронта реза представляет собой циклический процесс [18, 19]. В начале очередного цикла лидирующая часть лазерного пучка, падающая на участок поверхности перед фронтом реза под углом, близким к 90°, нагревает и плавит материал. Далее фронт плавления распространяется в глубь материала, формируя канал реза. Таким образом, необходимым условием инициирования канала реза при очередном цикле является нагрев поверхности листа перед фронтом реза до температуры плавления.

Оценка температуры поверхности разрезаемого листа затруднена из-за отсутствия надежных данных о коэффициенте поглощения при падении лазерного пучка на поверхность вдоль нормали. Коэффициент поглощения сильно зависит от шероховатости поверхности, ее чистоты, наличия окислов и т.п. Эта проблема, например, детально рассмотрена в монографии [20]. Однако обобщенный результат [20] состоит в том, что поглощение нержавеющей сталью излучения CO₂-лазера существенно меньше, чем излучения волоконного иттербиевого лазера. Например, в [20] для λ = 10.6 мкм при комнатной температуре приводится значение коэффициента поглощения 2%–5%, которое возрастает до 10% при нагреве до 1000 °С, а для λ = 1.07 мкм коэффициент поглощения составляет ~30% и слабо зависит от температуры.

Для оценки температуры поверхности перед фронтом реза используем полученное в [21] соотношение для температуры поверхности полуграниченного тела при нагреве его поверхностным тепловым источником с постоянной интенсивностью:

$$T = \frac{2q}{\lambda_m} \sqrt{\frac{\gamma \Delta t}{\pi}}, \tag{5}$$

где Δt – время действия источника; q – плотность теплового потока. Оценить температуру поверхности при нагреве движущимся источником можно с помощью соотношения для неподвижного импульсного источника, приняв за длительность импульса отношение характерного размера источника к скорости его движения [22]. Примем, что нагрев поверхности листа перед фронтом реза происходит не во всем пятне фокусировки излучения радиусом r_f, а только в его части размером ξr_f в направлении движения (ξ < 1). Тогда Δt = ξr_f/V_c и выражение для температуры участка поверхности листа перед фронтом реза имеет следующий вид:

$$T = \frac{4AW}{\pi b^2 \lambda_m} \sqrt{\xi \frac{2\gamma b}{\pi V_c}}, \tag{6}$$

где q = AW/(πr_f²); b = 2r_f.

Значение ξ не должно быть слишком большим, т.к. для формирования непрерывного реза с высоким качеством основная доля мощности пучка должна поглощаться на фронте реза внутри канала. На рис.8 представ-

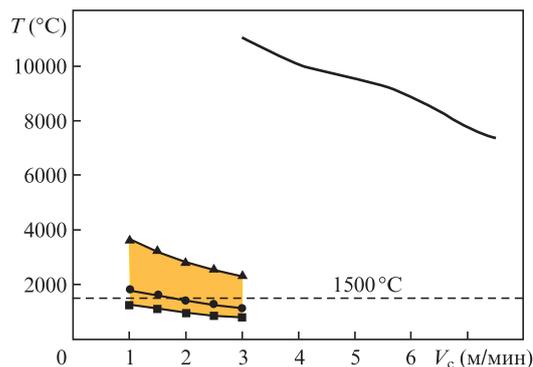


Рис.8. Рассчитанные по формуле (6) зависимости температуры поверхности от скорости резки с помощью CO₂-лазера (точки) и волоконного лазера (сплошная кривая) при h = 3 мм для A = 3.5% (■), 5% (●), 10% (▲) и 30% (сплошная кривая).

лены температуры поверхности, рассчитанные по формуле (6) при ξ = 0.1 с использованием наших данных по оптимальной ширине реза и данных работы [20] по коэффициенту поглощения для падения пучка вдоль нормали. Серая область соответствует условиям резки излучением CO₂-лазера. Видно, что эта область пересекается с линией T = 1500 °С, соответствующей температуре плавления при скоростях, близких к критической. Таким образом, за счёт малого коэффициента поглощения при резке излучением CO₂-лазера в атмосфере инертного газа поверхностная температура находится вблизи температуры плавления и уменьшается с ростом скорости, что и ограничивает предельную скорость резки. Принципиально другая ситуация наблюдается при расчёте поверхностной температуры для случая волоконного лазера. При тех же условиях и ξ = 0.1 получены явно завышенные для лазерной резки стали температуры. Это означает, что характерная для лазерной резки температура, не превышающая температуры кипения металла, может быть достигнута при меньшем значении ξ – излучение волоконного лазера обеспечивает более эффективный поверхностный нагрев металла. Если скорость резки излучением CO₂-лазера ограничивается недостаточным нагревом поверхности, то в случае волоконного лазера такое ограничение будет отсутствовать. Косвенным подтверждением такого ограничения в случае CO₂-лазера является показанное на рис.4 уменьшение ширины канала реза, т.е. увеличение ξ, при скоростях резки, превышающих критическую: большая часть мощности затрачивается на нагрев поверхности для инициирования канала.

5. Заключение

На основе экспериментального исследования энергетического баланса резки нержавеющей стали излучениями волоконного и CO₂-лазеров выявлены основные физические процессы, от которых зависит качество реза и которые ограничивают максимальную скорость резки. Установлено, что при резке с минимальной шероховатостью ширина реза и число Пекле не зависят от длины волны лазерного излучения (типа лазера) и определяются только скоростью резки.

Показано, что ограничение максимальной скорости резки излучениями волоконного и CO₂-лазеров может быть вызвано различными физическими причинами. При резке излучением CO₂-лазера в атмосфере инертного газа

процессы отражения от поверхности играют существенную роль и ограничивают максимальную скорость резки. В этом случае традиционные методы измерения коэффициента поглощения [1, 13, 16], которые не учитывают отражение от верхней поверхности, могут давать завышенные значения. Эти методы эффективно работают при лазерной резке в присутствии кислорода как вспомогательного газа, когда ширина реза обычно превышает диаметр пучка лазерного излучения, а наличие плёнки окислов повышает коэффициент поглощения. В случае резки в атмосфере инертного газа эти методы могут приводить к завышению плотности поглощённой энергии и температуры расплава. Именно этим обстоятельством объясняются избыточно высокие значения температуры при резке излучением CO₂-лазера, на которые обращалось внимание в работе [1] и которые получены из расчётов по формуле (6).

Результаты настоящей работы позволяют сделать вывод о том, что причинами ограничения скорости качественного реза являются снижение температуры расплава и возрастание его вязкости с ростом скорости, что препятствует эффективному удалению расплава. Такой вывод согласуется с результатами работы [1], где сообщалось о большей вязкости расплава при резке излучением волоконного лазера по сравнению с резкой излучением CO₂-лазера.

- Scintilla L.D., Tricarico L., Wetzig A., Beyer E. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, **69**, 30 (2013).
- Powell J., Kaplan A.F.H. *Proc. 31th Int. Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics ICALEO-2012* (Anaheim, CA, USA, 2012, p. 277).
- Himmer T., Pinder T., Morgenthal L., Beyer E. *Proc. 26th Int. Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics ICALEO-2007* (Orlando, FL, USA, 2007, p. 87).
- Olsen F.O. *Proc. 25th Int. Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics ICALEO-2011* (Scottsdale, AZ, USA, 2006, p. 188).
- Mahrle A., Beyer E. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **42**, 175507 (2009).
- Niziev V.G., Nesterov A.V. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **32**, 1455 (1999).
- Зайцев А.В., Ковалев О.Б., Смирнова Е.М. *Докл. IV Всерос. конф. «Взаимодействие высококонцентрированных потоков энергии с материалами в перспективных технологиях и медицине»* (Новосибирск, 2011, с. 94).
- Scintilla L.D., Tricarico L., Mahrle A., Wetzig A., Himmer T., Beyer E. *Proc. 29th Int. Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics ICALEO-2010* (Anaheim, CA, USA, 2010, p. 249).
- Hirano K., Fabbro R. *J. Laser Appl.*, **24**, 012006 (2012).
- Poprawe R., Schulz W., Schmitt R. *Phys. Procedia*, **5**, 1 (2010).
- Маликов А.Г., Оришич А.М., Шулятьев В.Б. *Квантовая электроника*, **39**, 547 (2009).
- Malikov A.G., Orishich A.M., Shulyatyev V.B. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, **49**, 1152 (2009).
- Маликов А.Г., Оришич А.М., Шулятьев В.Б. *Квантовая электроника*, **42**, 640 (2012).
- Афонин Ю.В., Гольшев А.П., Иванченко А.И., Малов А.Н., Оришич А.М., Печурин В.А., Филев В.Ф., Шулятьев В.Б. *Квантовая электроника*, **34**, 307 (2004).
- Маликов А.Г., Оришич А.М., Шулятьев В.Б. *Квантовая электроника*, **39**, 191 (2009).
- Miyamoto I., Mauro H. *Welding in the World*, **29**, 283 (1991).
- Prusa J.M., Venkitachalam G., Molian P.A. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, **39**, 431 (1999).
- Макашев Н.К., Асмолов Е.С., Блинков В.В., Борис А.Ю., Бузыкин О.Г., Бурмистров А.В., Грязнов М.Р., Макаров В.А. *Квантовая электроника*, **19**, 910 (1992).
- Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И. *Технологические процессы лазерной обработки* (М.: изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008, с. 524).
- Poprawe R., Weber H., Herziger G. (Eds) *Laser Physics and Applications* (Berlin, Springer-Verlag, 2004).
- Карслоу Г., Егер Д. *Теплопроводность твёрдых тел* (М.: Наука, 1964, с. 80).
- Вейко В.П., Либенсон М.Н., Червяков Г.Г., Яковлев Е.Б. *Взаимодействие лазерного излучения с веществом* (М.: Физматлит, 2008, с. 175).